

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06200

研究課題名(和文) 動的変化を伴う結合力学系の不変項抽出による機能共創に関する研究

研究課題名(英文) A study on functional co-creation by extracting invariants of coupled dynamical systems with dynamic changes

研究代表者

辻田 勝吉 (TSUJITA, Katsuyoshi)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20252603

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、動的変化を伴う結合力学系に対する相互作用の不変項および特異変数の抽出による共創システム設計原理の構築を行った。例題として大型宇宙展開構造物の地上試験用重力補償システムによる展開挙動解析、および人の起立・屈曲・着座の際の機械による運動支援システムにおけるシステムの挙動解析を行った。機械-機械および人-機械システムにおける要求機能としての非干渉系支援機能、および干渉系ミニマムインタラクションによるスキルフルな支援機能のそれぞれにおける不変項の抽出と特異変数に対する力学構造解析を行った。その結果、不変項まわりの制御入力に対する干渉項と非干渉項それぞれに対して、独立な制御則を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、動的な変化を伴う結合力学系、すなわち、機械-機械システムや人-機械システムの挙動解析およびモデル化は困難であった。本研究では、結合力学系の不変項の抽出により、干渉項および非干渉項の分離を行うことで、効率的なシステム設計を可能にした。本研究の成果により、系の持つ制御入力感度の違いを利用して、本質的に執拗な固有の挙動モードのみを選別でき、効率のよいシステムの開発への応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research project, the principle of the co-creation system design is developed through the extraction of interaction invariant terms and singular variables for coupled dynamical systems with dynamic changes. As an example, the analysis of the deployment behavior of large space-deployed structures using a gravity compensation system for ground tests, and the behavior of the system in a machine-assisted motion support system during standing, bending, and seating of humans. Invariant terms are extracted and analyzed for singular variables in non-interfering support functions and skillful support functions by interfering minimal interactions as required functions in machine-machine and man-machine systems, respectively.

As a result, independent control laws are proposed for the interfering and non-interfering terms for the control input around the invariant term, respectively.

研究分野：ロボット工学、システム工学

キーワード：結合力学系 不変項 干渉系 ミニマムインタラクション

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

形態変化や運動を行う機械や人などの力学系、およびこの力学系と接触などの力学的相互作用を行う別の力学系との双方から構成されるシステム全体を「動的変化を伴う結合力学系」と呼ぶ。このような系は、一般に複数の自律エージェントを内包するシステムであり、エージェント相互が協調し、秩序を形成し、機能を発現する。そして、この種のシステムにおいて「何を」「どのように」適切に相互作用を行うべきであるかという問題は、システム科学における長年の根源的なテーマである。特に、人と協調する機械システムあるいは、マルチモーダルな人工物の有機的な複合体としての人工物システムの秩序形成と機能発現は多くの研究がなされて来た。

動的変化を伴う結合力学系の本質は、エージェント間の相互制御変数が、ある状態変数から構成される多様体内部には非干渉系として機能し(自律的運動)、別のある多様体には干渉系の機能(非自律運動)を要求される機能発現問題となっている点である。従来の枠組みでは、タスクや目的に応じた個別の制御系設計や制御系の切り替えの議論が多く、双方の機能発現を統一的に扱うことができる制御系の設計原理は未だ確立されていなかった。本研究では、その設計論の構築を目指して課題研究を遂行した。

### 2. 研究の目的

「動的変化を伴う結合力学系」に対して、システムのマクロな機能発現のための秩序形成原理と、高多様体理論に基づいたミクロなエージェント間の相互作用の不変項および特異変数抽出による共創システム設計原理の構築を目指した。具体的な対象として、機械と機械の協調システムとして、宇宙用可変構造を持つ薄膜展開物の重力補償地上計測システムを例に採った。また、人と機械の協調システムとして、人の起立・屈曲・着座の際の運動支援装置を例に採った。いずれも動的な力学構造の変化を伴う結合力学系であり、一般化座標と一般化力のうち特異変数のみによって安定であり、本課題研究によって相互負荷の少ない巧みな協調制御を統一的に実現するシステムの構成原理を導くことを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、「動的変化を伴う結合力学系」として、二つの例題を設定した。機械 - 機械システムの例として大型宇宙展開膜面構造物の地上試験用重力補償システムによる展開挙動解析と、人 - 機械システムの例として人の起立・屈曲・着座の際の機械による運動支援システムにおけるシステムの挙動解析である。これらの例題の力学構造解析を連携して進めながら、そこに普遍的に存在するシステムのマクロな機能発現のための秩序形成原理を精査した。同時に、多様体理論に基づいたミクロなエージェント間の相互作用の不変項および特異変数抽出による共創システム設計原理の構築を行った。さらに、実証試験を通じた協調制御システムへの実装を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 展開構造を持つ宇宙機の群ロボット型地上試験システムの開発と展開挙動解析

近年の宇宙機の機能、構造の多様化に伴い、宇宙機用展開構造物の地上試験システムの汎用性拡大、多機能、低コスト化が求められている。一方で、宇宙用展開構造物は軌道上での展開時に予期しない挙動や振動による構造物の破損などの不具合を生じる可能性があり、事前の地上試験において展開作動の詳細な検証が求められる。無重力空間での挙動を地上で再現することは原理的に不可能であるため、地上試験においては展開運動に影響のある重力補償が大きな課題となっている。現在では展開構造物を離散的に幾つかの点で支持する懸架型やエアベアリングなどの下方支持型の地上試験装置が広く用いられている。

これまでに我々は、従来の重力補償装置と比べ安価で汎用性の高い複数台のロボットを用いた下方支持型重力補償システムを提案している(図1)。各ロボットは自律的に支持点における高精度の力制御により、宇宙空間での展開や振動現象を再現することができる。本研究では、ハードウェア実験を通して提案するシステムの制御性能を検証した(図2)。

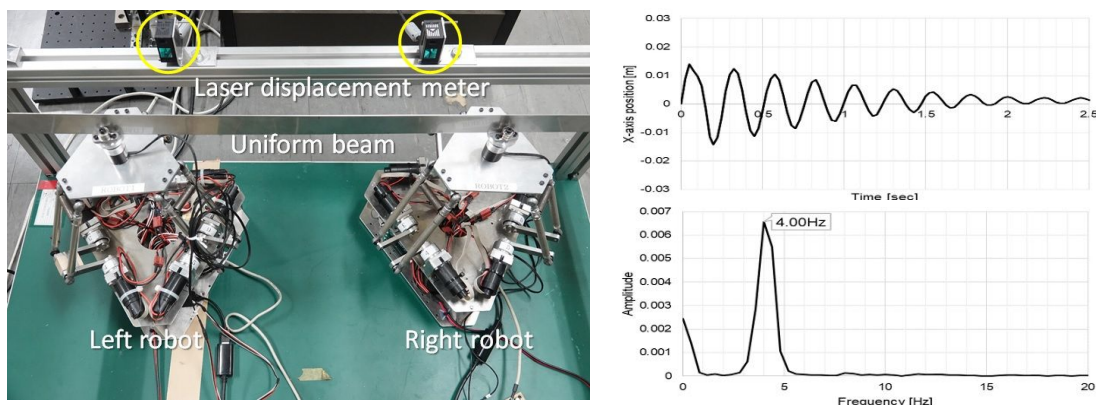


図1. 複数ロボットを用いた下方支持型重力補償システム実験装置

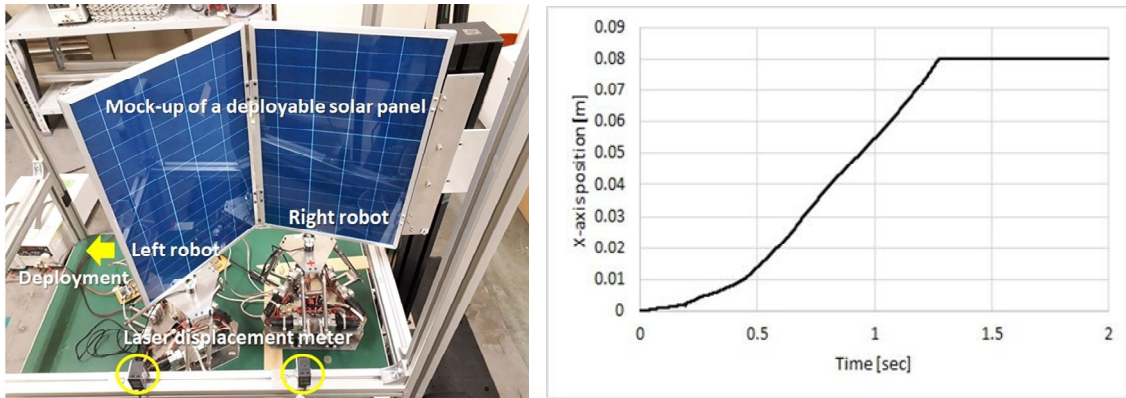


図 2 . モックアップ宇宙機のソーラーパネル展開試験と周波数特性

(2) 人間の起立動作時の転倒防止を目的とした運動解析

高齢者や運動機能障害者の人々が、安全かつ自律的に起立動作を行うような機器があれば、高齢者の転倒事故を減らし、健康寿命を延ばすことにつながると考えられる。起立動作の支援を行う機器を設計するにあたり、どのように動作支援を行うかが重要になる。体のどの部分を、どのタイミングで、どのように機能補助を行えば良いのかわからなければ、適切に設計を行うことは難しい。そこで、人間の起立動作時の運動について詳しく解析を行う必要がある。今回は、実際に健常者と運動機能障害者の運動を比較することによって、高齢者や運動機能障害者特有の動きを抽出することにした。

本研究では、人間の起立動作の解析方法として光学式モーションキャプチャシステムを用いて動作のキャプチャを行い、同時にフォースプレートを用いて同時に重心移動の計測を行った。これによって重心位置データの任意の瞬間での動作を見ることができ、健常者と比較して運動機能障害者や高齢者に顕著な運動要素の抽出を行うことが可能である(図3)。モーションキャプチャによって得られた身体の挙動を高次の関節角空間内に写像し、関節角間に存在する制約条件 = 不変項の抽出を試みた。さらに、高齢者や運動機能障害者に顕著な動作を行っている瞬間の重心位置等を比較することで、健全な起立動作に対してどのような障碍固有の動作があるか、その固有の動作モードを特定し、抽出した。その結果、人の起立動作において、関節角空間内での解軌跡は、2つの連続する拘束平面が存在し、起立動作中にこの二つの拘束平面内を遷移する動作を行っていることが明らかとなった(図4)。これらの関節角空間内での拘束平面は、いわゆる関節シナジーと呼ばれるものに対応するが、我々は、さらに拘束平面の構造を精査し、拘束領域と、起立動作中の遷移条件を求め、運動に主要なモードと非干渉モードを分離することに成功した。これらの成果により、健常者、障害者のそれぞれが持ち固有の運動モードが特定でき、障害者の転倒事故防止のための安価で効率のよいアシスト装置の開発、および支援プログラムへの応用が期待される。

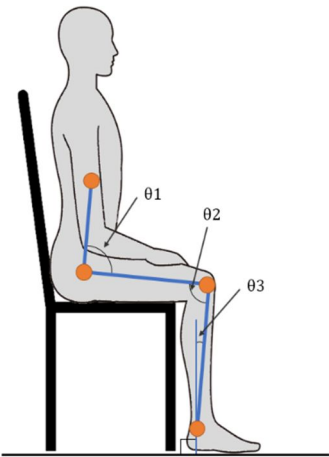


図 3 . 起立運動に主要な関節角度

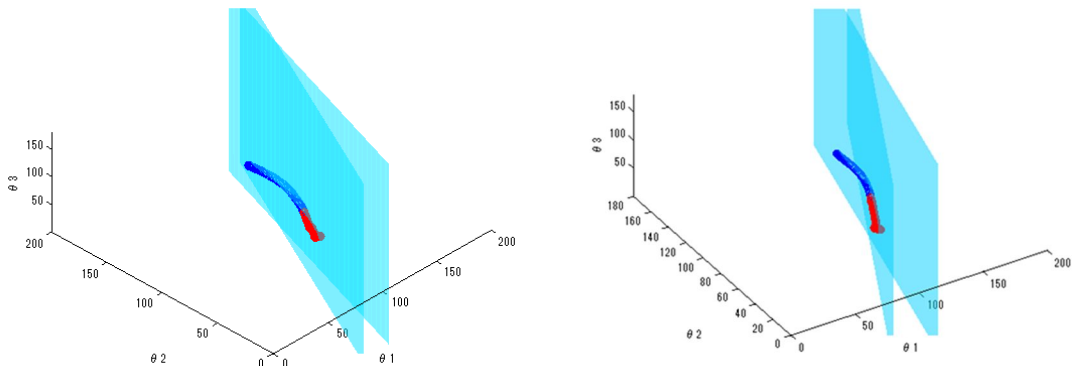


図 4 . 関節角空間内の 2 枚の拘束平面と動作モード遷移 (左 : 健常者、右 : 障碍模擬者)

(3) 展開パネルの展開挙動解析とモニタシステムの開発

「動的変化を伴う結合力学系」の例として、展開機構をもつ柔軟パネルの展開を取り上げた。軌道上は高真空・微小重力であるにも関わらず、現状、パネル結合部のバネ定数やガタ、減衰係数といった不確定要素は、数値計算と地上での展開試験との比較によって合わせこむしかない。そこで、軌道上で展開パネルに取り付けられた加速度センサーなどの限られた情報と、パネル展開解析結果とを VR システムを介して比較検討するモニタシステムを開発した(図5)。本システムにより、従来挙動予測が極めて困難であった展開パネルや膜構造体の展開挙動の詳細な力学モデルの導出および制御則の開発に大きく寄与することが期待される。

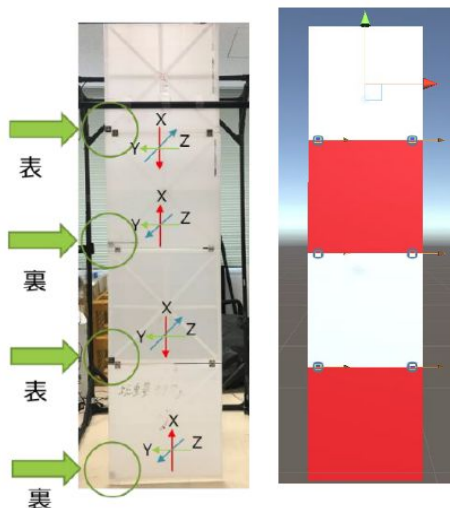


図5 . 展開パネルと VR モデル



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 岩佐貴史、樋口健、岸本直子	4. 巻 67
2. 論文標題 大型高精度宇宙構造物のための高解像度表面形状計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会誌	6. 最初と最後の頁 359-365
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shiino, Y., Kurihara, T., Ichinohe, R., Kishimoto, N., Yoshino, T. and Matsuoka, A.	4. 巻 -
2. 論文標題 A morphological analysis of the flat-shaped spumellarian radiolarian Dictyocoryne: morphofunctional insights into planktonic mode of life.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Paleontological Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2517/2019PR020	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takashi Yoshino, Atsushi Matsuoka, Naoko Kishimoto	4. 巻 38
2. 論文標題 Geometrical Properties of Skeletal Structures of Radiolarian Genus Didymocyrtis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Image Anal Stereol	6. 最初と最後の頁 235-242
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5566/ias.2089	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakayama Ayana, Hirata Tomohiro, Tsujita Katsuyoshi	4. 巻 25
2. 論文標題 A study of a gravity compensation system for the spacecraft prototype test by using multirobot system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 81-88
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-019-00568-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Naoko Kishimoto, Takashi Iwasa, Ken Higuchi	4. 巻 16
2. 論文標題 Surface Shape Measuring Method for Space Structures based on Images in Ultra-Violet Range	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 543-549
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 青木隆平, 樋口健, 岸本直子, 石澤淳一郎	4. 巻 65
2. 論文標題 宇宙インフレータブル構造の宇宙実証 (SIMPLE) ~その1	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会誌	6. 最初と最後の頁 100-107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岸本直子, 石澤淳一郎, 青木隆平, 樋口健	4. 巻 65
2. 論文標題 宇宙インフレータブル構造の宇宙実証 (SIMPLE) ~その2	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会誌	6. 最初と最後の頁 137-143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K.Fukui, K.Tsujita	4. 巻 28
2. 論文標題 A suitable design of assist system for human meal by reducing maneuverability variance in workspace	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 781-789
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計31件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 K.Miyazaki, and K.Tsujita
2. 発表標題 A study on motion estimation of the decommissioned spacecraft with a captured image
3. 学会等名 25th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A.Nakayama, and K.Tsujita
2. 発表標題 A study on autonomous state transition in the mobility of a space exploration rover
3. 学会等名 25th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤, 小川, 辻田
2. 発表標題 展開構造を持つ宇宙機の地上試験用運動計測システムの提案
3. 学会等名 電気通信情報学会 関西支部 第24回学生会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Hirata and K. Tsujita
2. 発表標題 A study of a gravity compensation system for the spacecraft prototype test by using multi robots
3. 学会等名 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋口諒, 横関智弘, 青木隆平, 岸本直子, 渡邊秋人, 黒瀬豊敏, 上土井大助
2. 発表標題 CFRP薄板製パッチアンテナ構造の熱変形評価
3. 学会等名 第5回宇宙太陽発電(SSPS)シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸本直子
2. 発表標題 蝶や鳥の羽に学ぶSegmented Morphing Skin構造
3. 学会等名 第57回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小嶋淳, 野口明裕, 青木滋, 鶴山尚大, 岸本直子, 大槻真嗣, 矢野智昭
2. 発表標題 インフレータブル構造を用いて自動展開・収納する膜シェルターの検討
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸本直子, 鈴木脩斗, 宮崎康行
2. 発表標題 真空チャンバー内における膜面の展開挙動の3次元計測
3. 学会等名 第61回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 清水, 池田, 佐藤, 辻田
2. 発表標題 人の起立運動時の転倒防止を目的とした運動解析
3. 学会等名 計測自動制御学会 SSI 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤居, 辻田
2. 発表標題 人の聴覚モデルを用いた高感度音源推定システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福嶋, 中川, 辻田
2. 発表標題 線画の筆致における速度パターン抽出による描画者の推定に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎, 中山, 小川, 齋藤, 平田, 辻田
2. 発表標題 展開構造を持つ宇宙機の群ロボット型地上試験システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K.Tsujita
2 . 発表標題 Development of a Location Finding System for Minute Sound Source by Using Human Acoustic System with Stochastic Resonance
3 . 学会等名 IEEE/RSJ IROS 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A.Nakayama, Y.Ogawa, S.Saito, T.Hirata, and K.Tsujita
2 . 発表標題 Development and Performance Evaluation of a Gravity Compensation System for the Spacecraft Prototype Test by Using Multi Robots
3 . 学会等名 32th International Symposium on Space Technology and Science ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Hirata, and K. Tsujita
2 . 発表標題 A study on support condition of a gravity compensation system for the spacecraft prototype test by using multi robots
3 . 学会等名 The 14th International Conference on Motion and Vibration Control ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Hirata and K. Tsujita
2 . 発表標題 A study of a gravity compensation system for the spacecraft prototype test by using multi robots
3 . 学会等名 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤, 小川, 辻田
2. 発表標題 展開構造を持つ宇宙機の地上試験用運動計測システムの提案
3. 学会等名 電気通信情報学会 関西支部 第24回学生会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川, 齋藤, 平田, 辻田
2. 発表標題 複数ロボットによる宇宙機の地上展開試験用システムの開発
3. 学会等名 平成30年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平田, 辻田
2. 発表標題 下方支持型ロボットによる宇宙機の地上展開試験用システムに関する研究
3. 学会等名 日本機会学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.Hirata, K.Tsujita
2. 発表標題 Simulation study on supporting condition of a robotic gravity compensation system for the prototype test of spacecraft
3. 学会等名 The 18th Int. Conf. on Advanced Robotics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoko Kishimoto, Takashi Iwasa, Ken Higuchi
2. 発表標題 Surface Shape Measuring Method for Space Structures based on Images in Ultra-Violet Range
3. 学会等名 The 31st International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Naoko Kishimoto
2. 発表標題 Measuring three dimensional shape of structure with high accuracy: from micro to macro
3. 学会等名 The 3rd Joint Turkey-Japan Workshop on Polymeric Composite Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 平田智大, 辻田勝吉
2. 発表標題 複数ロボットによる宇宙構造物の地上試験用重力補償システムの支持様態に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岸本直子, 岩佐貴史, 樋口健, 勝又暢久, 黒瀬豊敏, 渡邊秋人, 上土井大助
2. 発表標題 CFRP製パネル構造物の3次元形状計測
3. 学会等名 第59回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岸本直子, 藤垣元治, 岩佐貴史, 樋口健, 勝又暢久
2. 発表標題 画像による複合材料板の変形・ひずみ計測
3. 学会等名 第61回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新田和久, 岸本直子, 辻田勝吉
2. 発表標題 宇宙展開構造物の下方支持型重力補償装置プロトタイプモデルの開発
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部 第93期定時総会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中西健太, 新田和久, 岸本直子
2. 発表標題 地上試験用の重力補償装置における治具の評価
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部 2017年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上阪 港, 笠原稜太, 辻田勝吉
2. 発表標題 体幹剛性可変な四脚歩行ロボットを用いた体幹揺動歩行の実現
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部 2017年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下航生, 楠木大成, 辻田勝吉
2. 発表標題 人の階段昇降時の運動モード解析による転倒危険回避に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部 2017年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K.Nitta, K.Tsujita and N.Kishimoto
2. 発表標題 Development of a robotic gravity compensation system for the prototype test of spacecraft
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 辻田, 重松, 岸本
2. 発表標題 宇宙用伸展構造物の下方支持型ロボット地上試験システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会2016
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="http://www.oit.ac.jp/www-ee/server/islab/dynamics/research_j.html">http://www.oit.ac.jp/www-ee/server/islab/dynamics/research_j.html</a>
---

